



Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Farklı Kanat Profillerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Cevahir Tarhan¹, Mehmet Ali Çil^{2*}

ÖZ

Rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerji miktarı her geçen gün artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin güç çıkışlarını etkileyen faktörlerden birisi de kanat profilleridir. Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılan farklı (NACA 0009, NACA 2415, NACA 4415, NACA 4424, NACA 6412, NACA 6415, NACA 24112, FX 63-137, GOE 795, NREL's S824, SD 5060, SG6040) kanat profillerinin Qblade yazılımı kullanılarak simülasyonları oluşturulup sayısal analizleri yapılmış ve aerodinamik performansları incelenmiştir. Sayısal analizler 0°- 20° arası hücum açılarında ve 5×10^4 , 2×10^5 1×10^6 Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. En yüksek aerodinamik verimliliğe sahip kanat profilleri NACA 6412, NACA 6415 ve NACA 4415 olarak belirlenmiş ve bu kanat profillerinden üç kanatlı rüzgâr türbini oluşturulup elde edilen güç çıkışları ve performans değerleri bulunmuştur. Bu kanat profilleri için uç-hız oranı 6.5 ila 7.8 aralığında maksimum verim alınmıştır. Sonuç olarak rüzgâr türbinlerinde NACA 6412, NACA 6415 ve NACA 4415 kanat profilleri kullanılarak türbinden alınacak verim maksimum seviyede olacaktır. Bu çalışmada, literatürde mevcut olmayan AG37, AH 80-140 NACA 8824 ve RG-12 kanat profilleri literatüre katkı sağlamak amacıyla analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbini, kanat profili, taşıma katsayısı, hücum açısı, qblade, nümerik analiz, bilgisayar destekli tasarım

Numerical Investigation of Different Blade Profiles Used in Wind Turbines

ABSTRACT

The amount of energy obtained from wind turbines is increasing day by day. One of the factors affecting the power output of wind turbines is blade profiles. In this study, simulations of different blade profiles (NACA 0009, NACA 2415, NACA 4415, NACA 4424, NACA 6412, NACA 6415, NACA 24112, FX 63-137, GOE 795, NREL's S824, SD 5060, SG6040) using Qblade software created, numerically analyzed and their aerodynamic performances were examined. Numerical analyzes were performed at angle of attack between 0° and 20° and Reynolds numbers of 5×10^4 , 2×10^5 , 1×10^6 . Blade profiles with the highest aerodynamic efficiency were determined as NACA 6412, NACA 6415 and NACA 4415, and the power outputs and performance values obtained by creating a three-bladed wind turbine from these blade profiles were found. Maximum efficiency was obtained for these blade profiles in the tip-speed ratio range of 6.5 to 7.8. As a result, the efficiency to be obtained from the turbine will be at the optimum level by using NACA 6412, NACA 6415 and NACA 4415 blade profiles in wind turbines. In this study, AG37, AH 80-140, NACA 8824 and RG-12 blade profiles, which are not available in the literature, were analyzed in order to contribute to the literature.

Keywords: Wind turbine, airfoil, lift coefficient, angle of attack, qblade, numerical analysis, computer aided design

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 15.07.2021

Kabul/Accepted : 13.09.2021

¹ Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Sivil Havacılık Bölümü, Kayseri
ctarhan@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4762-6719

² Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Sivil Havacılık Bölümü, Kayseri
mehmetali.cil20@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-9322-1563

EXTENDED ABSTRACT

With the increase in the world population, the need for energy also increases. Renewable energy sources and fossil fuels are used to meet this energy demand. The importance of renewable energy sources is increasing due to the fact that they have a certain life in fossil fuels and the damage they cause to the environment. Wind energy is one of the renewable energy sources [1]. Thanks to wind turbines, energy can be obtained from the wind. The amount of energy obtained with the development of wind turbines is also increasing. The parts of horizontal axis wind turbines that are widely used today are classified as follows; It consists of a tower, generator, gear box, hub, electrical-electronic parts and wing [2]. Airfoils are one of the most important elements in a wind turbine. Convert the kinetic energy of the wind into mechanical energy with wing profiles. The performance of the wind turbine blade profile is related to the lift (Cl) and drag (Cd) force. The Cl/Cd ratio determines the aerodynamic performance. Many numerical and experimental studies have been done on the aerodynamic performance of airfoils. Some of these studies are described in the manuscript. Blade profiles used in wind turbines are divided into a certain class and named systematically. The cost of experimental analysis of the newly designed airfoils is high. Instead, there are software that perform performance analysis. The Qblade software is one of these software. It is possible to calculate the performance of the wind turbine with the Qblade software [25]. Blade element momentum (BEM) theory is used in Qblade software [26]. With the BEM theory, the design of wind turbines is done easily [5]. BEM theory is the combination of 'momentum theory' and 'blade element theory' [22]. In the studies conducted by Mahmuddin [22] and Moriarty and Hansen [27], BEM theory has been explained in detail.

NACA 0009, NACA 2415, NACA 4415, NACA 4424, NACA 6412, NACA 6415, NACA 24112, FX 63-137, GOE 795, NREL's S824, SD 5060, SG6040 airfoils at different angles of attack (α) (0° to 15°) and 5×10^4 , 2×10^5 1×10^6 Reynolds numbers, lift coefficients (Cl), drag coefficients (Cd), Cl / Cd and in addition to these, power coefficients (Cp), power information and Thrust information at different tip speeds (TSR) (0 to 10) simulations were created with Qblade software, graphs were created and numerical analyses were made. It was determined that the lift coefficient, drag coefficient and Cl/Cd ratio obtained as a result of the numerical analysis of the airfoils with the Qblade software are compatible with similar studies in the literature. It has been concluded that numerical analysis of airfoils is possible with Qblade. In this study, AG37, AH 80-140, NACA 8824 and RG-12 blade profiles, which are not available in the literature, were analyzed in order to contribute to the literature.

For the number $Re = 2 \times 10^5$, the wing profiles with the highest lift coefficient value are NACA6415, FX 63-137, NACA 6412 and NACA 4415. The maximum lift coefficient values of these airfoils at 0° - 15° angle of attack are 1.73, 1.66, 1.65 and 1.47, respectively. The drag coefficients of NACA 0009, NACA 24112 and GOE 795 airfoils increase faster than the other airfoils after 10° of attack. Wing profiles with the highest Cl / Cd ratio for $Re = 2 \times 10^5$ are FX 63-137, NACA 6412, GOE 795, SG6040, NACA 4415 and NACA6415. The maximum Cl/Cd ratio values of these wing profiles at 0° - 15° angle of attack are 89.12, 78.86, 74.2, 73.06, 71.88 and 71.33, respectively. For the number $Re = 1 \times 10^6$, the wing profiles with the highest lift coefficient are FX 63-137, NACA 6415, NACA 6412 and NACA 4415. Maximum lift coefficient values are 1.80, 1.74, 1.70 and 1.63, respectively. Wing profiles with the highest Cl/Cd ratio for $Re = 1 \times 10^6$ number and 0° - 15° angle of attack are NACA 6412, NACA 6415, NACA 4415 and SG6040. Maximum Cl / Cd ratio values are 147.1, 135.5, 128.665 and 116.6, respectively.

Numerical analysis performed at three different Reynolds numbers obtained the highest aerodynamic performance at $Re = 1 \times 10^6$. In this issue, the wind turbine simulation consisting of NACA 6412, NACA 4415 and NACA 6415 blade models was created with the Qblade software. The maximum Cp values are 0.442, 0.43 and 0.41, respectively. The maximum power output values obtained are 420, 410 and 390, respectively. NACA6412 and NACA4415 wing profiles reached these values at the tip-speed ratio of 7, and the NACA 6415 airfoil at the tip-speed ratio of 7.5. Thrust values at 10 at the tip-speed ratio are 196 for NACA 6415, 188.5 for NACA 4415 and 188 for NACA 6412.

As a result of the study with 3 different Reynolds numbers, it was observed that both the lift coefficients and the Cl/Cd ratios increased and the drag coefficients decreased with the increase of the Reynolds number. The best result was obtained at 1×10^6 Reynolds number.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ile beraber enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bu enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynakları ve fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlarında belli bir ömre sahip olması ve çevreye verdiği zararlardan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır. Rüzgâr enerjisi de yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir [1]. Rüzgâr türbinleri sayesinde rüzgârdan enerji elde edilebilir. Rüzgâr türbinlerinin gelişmesi ile elde edilen enerji miktarı da artmaktadır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin parçaları şu şekilde sınıflandırılır; dişli kutusu, kule, göbek, jeneratör, kanat ve elektrik-elektronik parçalardan oluşmaktadır [2]. Rüzgâr türbininde en önemli elemanlardan birisi de kanat profilleridir. Kanat profilleri ile rüzgârın kinetik enerjisi mekanik enerjiye dönüşür.

Rüzgâr türbini kanat profiline performansı, taşıma(C_l) ve sürüklenme(C_d) kuvveti ile ilişkilidir. C_l/C_d oranı aerodinamik performansı belirler. Kanat profillerinin aerodinamik performansı üzerine birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır. Körpe ve Darak [3] başlangıç profil olarak NACA 4412 profilini seçmişler ve bu kanat profiline en yüksek verimi almak için kanat kalınlığını ve kamburluk oranını değişken olarak kabul edip en düşük sürüklenme kuvvetini elde etmek için bu değişkenlerin değerlerinde oynamalar yapmışlardır, daha iyi verim alabilmek için alt ve üst limitleri belirlenmişler ve sonuç olarak kalınlık için kordun %9-18 aralığı, kamburluk oranı için kordun %0-10 aralığında olması gerektiğini belirlemişlerdir. Alaskari ve Ark. [4] rüzgâr türbinlerinde kullanılan SG6043 kanat profili üzerine yaptığı çalışmada hücum açısı 2° maksimum aerodinamik performans gösterdiğini ve rüzgâr türbininin optimum performansını uç-hız oranı 8'de elde ettiğini bulmuşlardır. Koç ve Ark. [5] yaptığı çalışmada ise SG6043 rüzgâr türbini kanat profiline değişken hücum açılarındaki taşıma katsayısı ve taşıma/sürüklenme oranı değerini Qblade yazılımını kullanarak incelemişler, SG6043 kanat profili için maksimum performans gösterdiği hücum açısını 4,50 olarak bulmuşlardır. Görgülü ve Ark.[6] NACA 0009 kanat profiline analizi için yaptığı çalışmada düşük Reynolds sayısında maksimum C_l/C_d oranını 5 hücum açısında bulmuşlardır. Şahin ve Acır [7] NACA 0015 kanat profili üzerine sayısal ve deneysel olarak çalışma yapmışlardır. 80° lik hücum açısında maksimum verim alındığını ve sayısal ile deneysel sonuçların uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Tanürün ve Ark.[8] rüzgâr türbinlerinde kullanılan NACA 0018 kanat profiline aerodinamik performansını hesaplamak için sayısal ve deneysel analiz yapmışlardır. Singh ve Gill [9] NACA 0008 ve NACA 0012H kanat profillerini özelliklerini Qblade yazılımı ile simülasyon oluşturarak karşılaştırmışlar, NACA 0012H profiline taşıma katsayısı ve taşıma/sürüklenme oranının NACA 0008 den daha iyi olduğunu ve bunun sebebinin de kord kalınlığı ile ilgili olduğu sonucuna varmışlardır. Husaru ve Ark. [10] Qblade yazılımını kullanarak NACA 4415 kanat profili ile ilgili sayısal analiz yapmışlar ve NACA 4415 kanat profiline ilişkin maksimum taşıma katsa-

yısının hücum açısını 11° , minimum sürüklenme katsayısının hücum açısını 5° ve maksimum taşıma/sürüklenme oranının hücum açısını 6° olarak bulmuşlardır. Raut ve Ark. [11] NACA 4415, NACA 4420, SG6041, SG6042 ve SG6043 rüzgâr türbini kanat profilleri Qblade yazılımını kullanarak karşılaştırmışlar, hücum açılarına göre her bir kanat profilin taşıma katsayısını, sürüklenme katsayısını ve taşıma/sürüklenme oranlarını incelemişler ve sonuç olarak yaptıkları çalışmada SG6043 kanat profilinin 8° - 14° hücum açısı için maksimum taşıma katsayısının 1.63 olduğunu ve SG6043 profilinin hücum açısı 4° - 8° için maksimum taşıma/sürüklenme oranını verdiğini belirlemişlerdir. Handoyono ve Wardhana [12] NACA 4412, NACA 23012 ve NACA 16-212 yatay eksenli rüzgâr türbini kanat profilleri üzerine yaptıkları çalışmada farklı hücum açılarındaki taşıma katsayılarını, sürüklenme katsayılarını ve taşıma/sürüklenme oranlarını Qblade yazılımını kullanarak karşılaştırmışlar, sonuç olarak NACA 4412 kanat profilinin diğer iki profile göre daha yüksek taşıma katsayısına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Muftah [13] farklı hücum açıları ve Reynolds sayılarında NACA 2414 kanat profilinin taşıma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve taşıma/sürüklenme oranını incelemiş, yaptığı bu çalışmada en iyi aerodinamik performansın 5 derecelik hücum açısında olduğunu ve Reynolds sayısı arttıkça taşıma/sürüklenme oranının yükseldiği sonucuna varmıştır. Shabur ve Ark. [14] 3×10^4 ve 7×10^4 olan iki farklı düşük Reynolds sayısında NACA 0018 ve NACA 0012 iki simetrik kanat profilini incelenmişler, NACA 0012'nin aynı Reynolds sayısı için NACA 0018'den daha fazla taşıma ürettiğini belirlemişlerdir. Zahari [15] yaptığı araştırmada on farklı tip NACA kanat profilinin sürüklenme katsayısını belirlemek için NACA 6412, NACA 6409, NACA 4424, NACA 2418, NACA 2408, NACA 1410, NACA 1408, NACA 0015, NACA 0009 ve NACA 0006 kanat profillerini incelemiş, aynı koşullarda en yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan kanat profilinin NACA 4424 olduğunu ve en düşük sürüklenme katsayısına sahip olan kanat profilinin NACA 0006 olduğunu belirlemiştir. García ve Ark. [16] rüzgâr türbini için NACA 24112, NACA22112, NACA25112, NACA 4412 ve NACA 64212 profillerinin aerodinamik performansı üzerine çalışma yapmışlardır. Düz [17] yapmış olduğu çalışmada NACA kanat profillerinden ayrı olarak GOE 795, EPPLER 580, FX 63-137, FX 84-W-218 ve SELIG S8036 kanat profillerini, farklı rüzgâr hızlarında ve hücum açılarındaki performansını nümerik olarak test etmiş, kanat profili üzerindeki etkili olan değişkenlere göre maksimum taşıma/kaldırma oranını bulmayı hedeflemiştir. Wang ve Ark. [18] CQU-A25 ve DU91-W2-250 kanat profillerinin aerodinamik performansını karşılaştırmışlar ve sonuç olarak CQU-A25 kanat profilinin taşıma/sürüklenme oranı aynı koşullardaki DU91-W2-250 kanat profilinden daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Selig ve McGranahan [19] rüzgâr türbinlerinde kullanılan SH3055, SD2030, S834, S822, FX 63-137 ve E387 kanat profillerini farklı Reynolds sayılarında taşıma ve sürüklenme katsayılarını bulmak için rüzgâr tüneline test etmişlerdir. Kale ve Ark.[20] rüzgâr türbinlerinde kullanılan NACA



2412, SG 6042, IND 15045 ve IND 09848 kanat profilleri sayısal analizlerini yapmışlardır. IND 15045 ve IND 09848 küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için geliştirilen kanat profilleridir ve bu kanat profillerinin Cl/Cd oranı NACA 2412, SG 6042 profillerinden daha iyi sonuç vermiştir.

Nachtane ve Ark. [21] Qblade yazılımı ile oluşturulan simülasyonun doğruluk payını ölçmek için deney yapmışlar, deney için rüzgâr türbini kanat profillerinde kökte NACA 63-824 ve uçta NACA 63-812 olan NACA 63-8XX kanat profilini kullanmışlar, elde ettikleri sonuçlar ile Qblade yazılımındaki sonuçları karşılaştırdıklarında verilerin uyduğuna gözlemlemişler ve aynı zamanda Qblade yazılımının tasarım aracı olarak kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır. Mahmuddin [22] yaptığı çalışmada NACA 2415 kanat profilinin sayısal analizini yapmış ve bu araştırma sonucunun Qblade yazılımı ile uyduğuna gözlemlemiştir.

NACA kanat profillerinden hariç rüzgâr türbinleri için özel oluşturulan kanat profilleri vardır. RISO kanat yapısı Danimarkalılar, DU kanat yapısı Almanlar, FFA-W kanat yapısı İsveçler ve NRELS kanat yapısı Amerikalılar tarafından oluşturulmuştur [18].

Detaylı bir literatür taramasından sonra rüzgâr türbinlerinde kullanılan on iki farklı kanat profili belirlenmiştir. Bu kanat profillerinin sayısal analizi 0°-20° arası hücum açılarında ve 5×10^4 , 2×10^5 1×10^6 Reynolds sayılarında yapılmıştır. Diğer makalelerden farklı olarak 12 farklı kanat profili birlikte karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırılması yapılan kanat profillerinden aerodinamik verimliliği en yüksek olan kanat profillerinin belirlenmesi ve bu kanat profillerinden oluşturulacak kanat modellerinin rüzgâr türbini üzerinde simülasyonu hazırlanarak elde edilen performans değerleri ve güç üretimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2-GEREÇ VE YÖNTEM

Kanat profilinin performansı aerodinamik verimlilik ile hesaplanır. Aerodinamik verimlilik taşıma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranıdır. Uçuş yönüne dik doğrultuda uygulanan kuvvete taşıma kuvveti denir. Taşıma kuvveti, bir kanat profilinin üst yüzey bölgesi ile alt yüzey bölgesi arasındaki havanın basınç farkı olduğunda elde edilen bir kuvvettir. Sürüklenme kuvveti uçağın hareket doğrultusundaki harekete zıt yönde etki eden kuvvettir. Sürüklenme kuvveti aerodinamik kanat profili üzerindeki basınç dağılımından ve aerodinamik kanat profili boyunca havanın hareketinden oluşur. Sürüklenme kuvveti uçak performansını düşürür, yakıt tüketimini artırır. Taşıma kuvveti Denklem (2.1) ile sürüklenme kuvveti Denklem (2.2) ile bulunur (ρ =yoğunluk(k/m^3), (A =kanat alanı(m^2)), (V =hız(m/s))) [23]. Denklem (2.3)'de Reynolds sayısı verilmiştir ($(\rho v_s = \text{eylemsizlik kuvvetleri})$, ($\mu/D = \text{viskozite kuvvetleri}$))[24].



$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad (2.1)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (2.2)$$

$$Re = \frac{\rho v_s}{u} = \frac{d v_s}{v} \quad (2.3)$$

Rüzgâr türbini güç çıkışını etkileyen önemli parametrelerden biri de uç-hız oranıdır (TSR). Uç-hız oranı kanat açılma hızı (ω), kanat yarıçapı (R) ve rüzgâr hızı (V) değişkenlerine bağlıdır. TSR kanat uç hızının, rüzgâr hızına oranıdır. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde uç-hız oranı (λ) 5-8 civarındadır [25].

$$\lambda = \frac{V_{uç}}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (2.4)$$

Güç katsayısı rüzgâr türbinlerinde rüzgâr gücünden ne kadar verim alınabildiğinin belirlenmesine yardımcı olan önemli faktörlerden biridir. Bu katsayı kanatların rüzgârdan elde ettiği gücün (N_R), rüzgâr gücüne (N) oranı olarak ifade edilir.

$$C_p = \frac{N_R}{N} = \frac{N_R}{(0,5\rho\pi R^2 V^3)} \quad (2.5)$$

Bu denklemde, kanat yarıçapı R (m), havanın yoğunluğu ρ (kg/m^3), rüzgâr hızı V (m/s) olarak verilmektedir. Rüzgâr türbinlerinde C_p , θ (kanat açısı) ve λ 'nın bir fonksiyonu olarak Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'den yararlanılarak belirlenebilmektedir. Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) tüm kanat yapıları için kullanılabilir [26].

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \theta - C_4 \theta^{C_5} - C_6 \right) \exp\left(\frac{-C_7}{\lambda_i}\right) \quad (2.6)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{\lambda + C_8 \theta} \right) - \left(\frac{C_9}{\theta^3 + 1} \right) \right]} \quad (2.7)$$

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanat profilleri belirli bir sınıflara ayrılıp sistematik olarak adlandırılmaktadır. Tasarlanan yeni kanat profillerinin deneysel analizlerini yapmanın maliyeti yüksektir. Bunun yerine performans analizi yapan yazılımlar vardır. Qblade yazılımı da bu yazılımlardan biridir. Qblade yazılımı ile rüzgâr türbininin performansını hesaplamak mümkündür [27]. Qblade yazılımında Blade element momentum (BEM) teorisi kullanılmaktadır [28]. BEM teorisi ile rüzgâr türbinlerinin tasarımı kolay bir şekilde yapılmaktadır [5]. BEM teorisi, 'momentum teorisi' ve 'pal eleman teorisinin' birleşimidir [22]. Mahmuddin [22] ile Moriarty ve Hansen [29] tarafından yapılan çalışmalarda BEM teorisi detaylı olarak açıklanmıştır.

**Tablo 1.** Qblade ile Literatür Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kanat profili	Reynolds sayısı	Cl, Cd veya Cl/Cd	Hücum açısı	Qblade sonuçları	Literatür sonuçları
GOE795	1.25x10 ⁵	Cl	0°	0.205	0.223 [17]
			5°	0.82	0.748 [17]
			10°	1.07	1.115 [17]
FX 63-137	1.25x10 ⁵	Cl	0°	0.7	0.803 [17]
			5°	1.3	1.328 [17]
			10°	1.67	1.753 [17]
NACA0009	5x10 ⁴	Cl	6°	0.65	0.60 [30]
			8°	0.76	0.74 [30]
			10°	0.64	0.67 [30]
NACA4415	3.49x10 ⁶	Cl	0°	0.49	0.4 [31]
			5°	1.06	0.96 [31]
			10°	1.50	1.34 [31]
NACA4424	6x10 ⁴	Cd	0°	0.07	0.071 [32]
			4°	0.09	0.092 [32]
			8°	0.12	0.116 [32]
NACA6412	1.75x10 ⁵	Cl/Cd	0°	54.1	53.41 [33]
			4°	77.05	74.65 [33]
			8°	77.7	48.61 [33]
NACA6415	1x10 ⁵	Cl	5°	0.73	0.66 [34]
			10°	0.97	0.98 [34]
			15°	1.09	1.08 [34]
SG6040	3x10 ⁵	Cl	5°	0.92	0.86 [35]
			10°	1.25	1.26 [35]
			15°	1.31	1.32 [35]

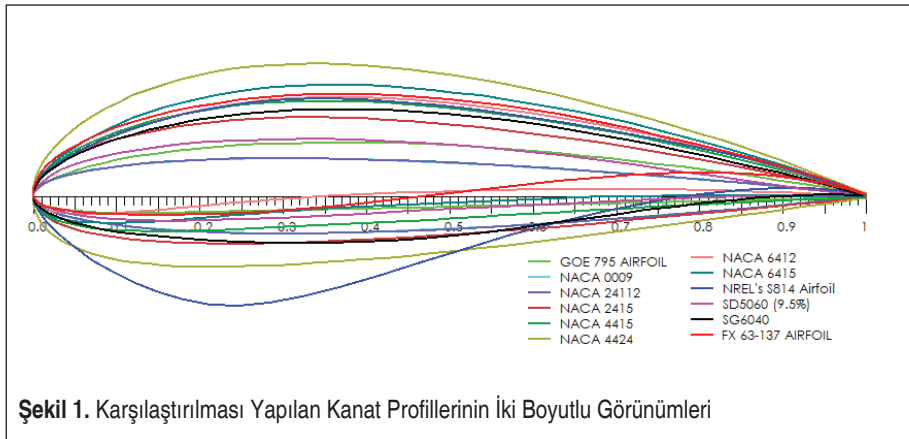
Kanat profillerinin sayısal analizleri incelemek için Qblade ile bulunan değerler ile literatürde bulunan değerlerin karşılaştırılması Tablo 1’de verilmiştir.

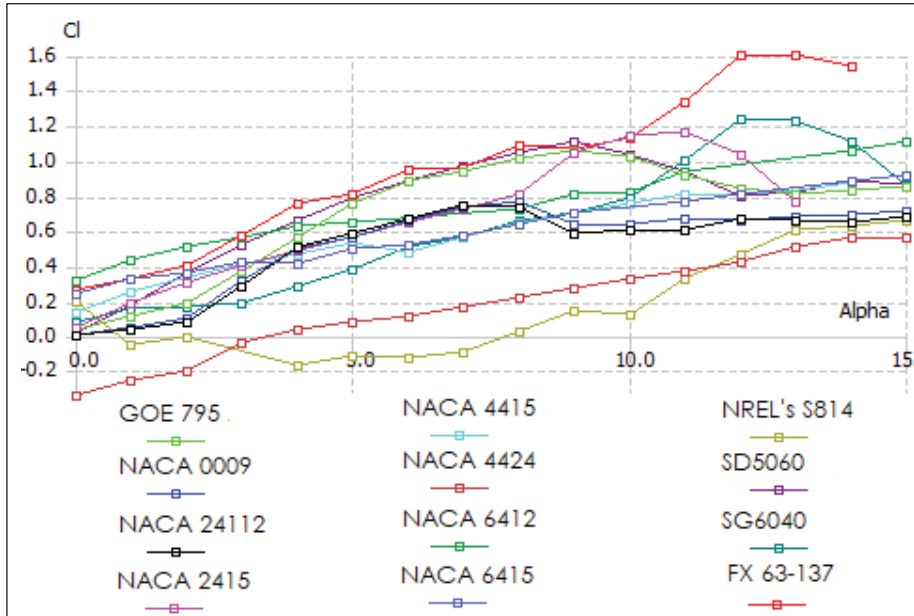
Bu çalışmada Qblade yazılımı kullanılmıştır. Qblade ile yapılan bu çalışma sonucunda bulunan değerler ile literatürde bulunan değerlerin uyduğu gözlemlenmiştir. Literatür taramasından sonra Qblade yazılımının kanat profillerinin performansını hesaplanmasında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

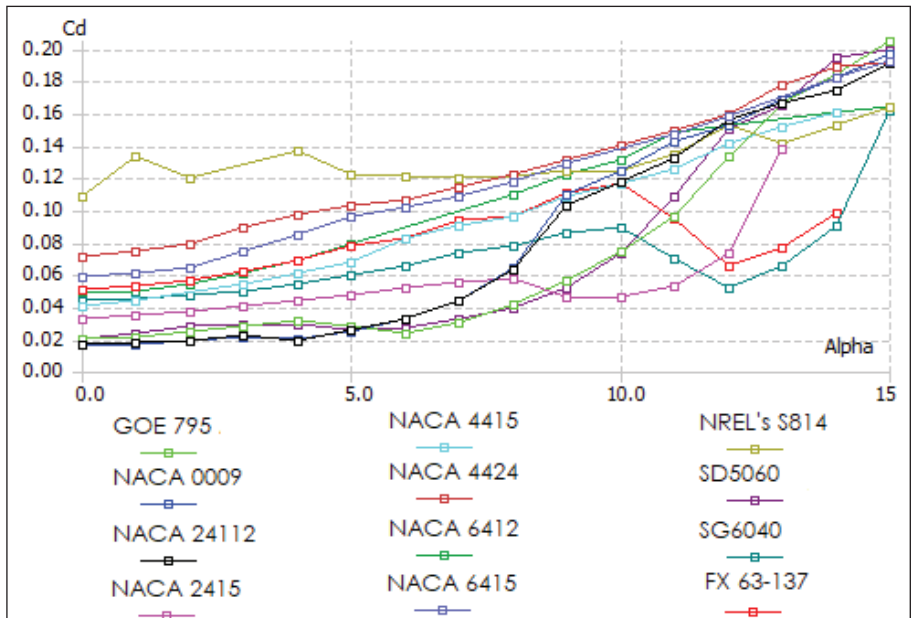
Bu bölümde ilk olarak daha önce üzerine çalışma yapılmış olan kanat profilleri belirlenmiş (NACA 24112, NACA 6415, NACA 6412, NACA 4424, NACA 4415, NACA 2415, NACA 0009, FX 63-137, GOE 795, NREL’s S824, SD 5060, SG6040) ve sayısal analizler yapılmıştır. Daha sonra literatür taramasından sonra detaylı olarak aerodinamik performans üzerine çalışma yapılmayan AG37, AH 80-140 NACA 8824 ve RG-12 kanat profilleri belirlenmiştir. Bu kanat profillerinin performans analizleri literatüre katkı sağlamak amacıyla Qblade yazılımı ile yapılmıştır.

NACA 24112, NACA 6415, NACA 6412, NACA 4424, NACA 4415, NACA 2415, NACA 0009, FX 63-137, GOE 795, NREL’s S824, SD 5060, SG6040 kanat profillerinin farklı hücum açılarında (Alpha) (0° ila 15°) ve 5×10^4 , 2×10^5 1×10^6 Reynolds sayılarında taşıma kuvveti katsayıları (Cl), sürüklenme kuvveti katsayıları (Cd), Cl/Cd oranı ve bunlara ek olarak güç katsayıları (Cp), güç(power) değerleri ve Thrust değerleri farklı uç hız değerlerinde (TSR) (0 ila 10) Qblade yazılımı ile simülasyonları hazırlanıp, grafikler oluşturulmuş ve sayısal analizler yapılmıştır.

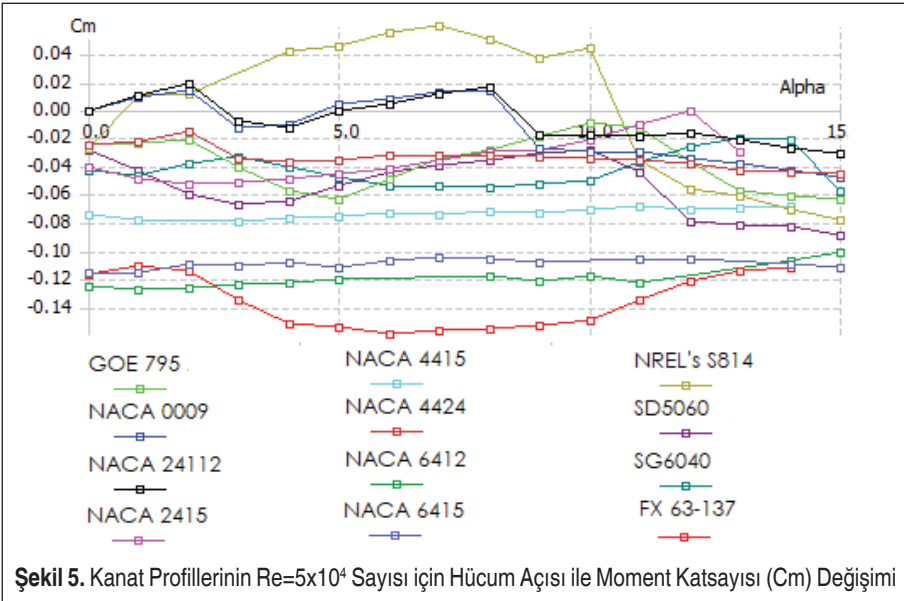
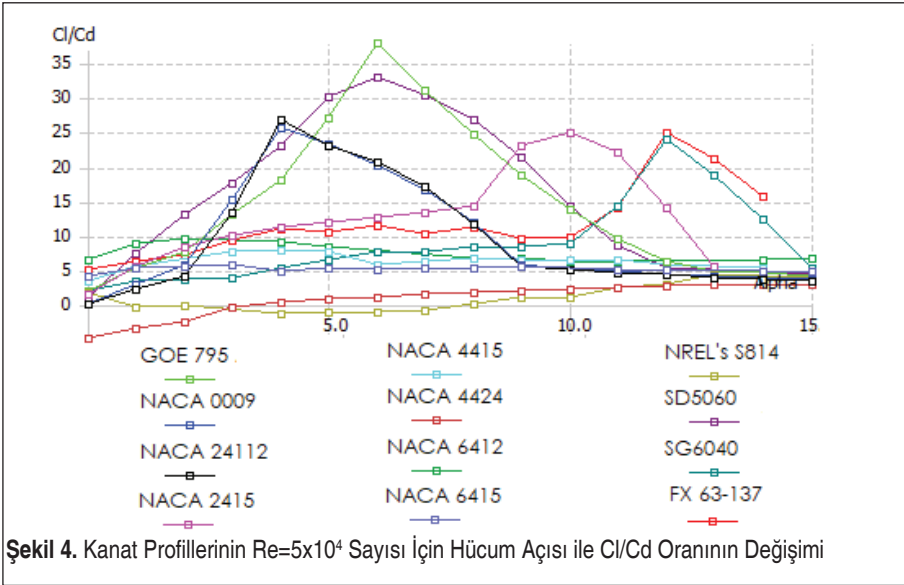




Şekil 2. Kanat Profillerinin $Re=5 \times 10^4$ Sayısı için Hücum Açısı ile Taşıma Katsayısının (C_l) Değişimi



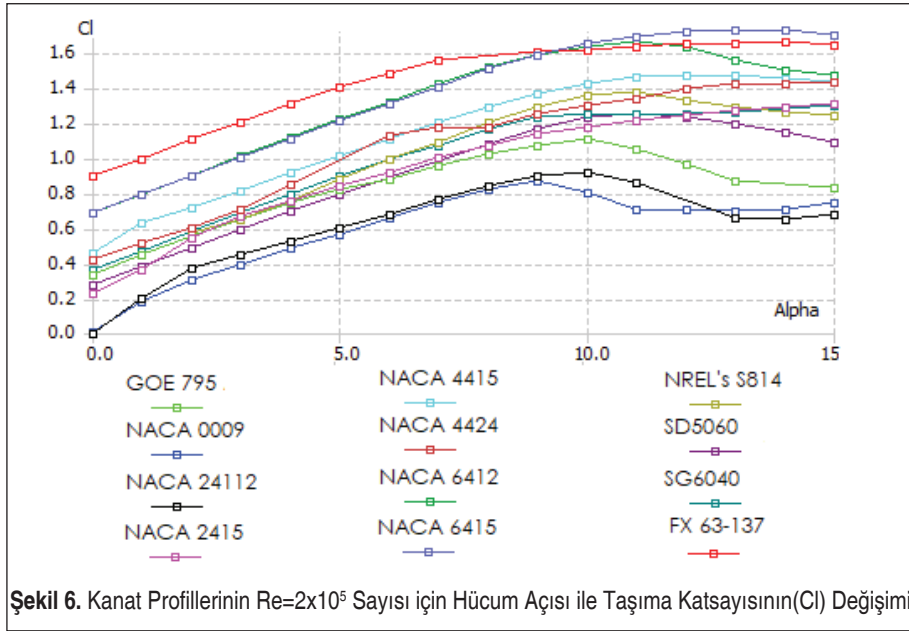
Şekil 3. Kanat Profillerinin $Re=5 \times 10^4$ Sayısı için Hücum Açısı ile Sürüklenme Katsayısının (C_d) Değişimi



$Re=5 \times 10^4$ sayısı için taşıma katsayısı değerinin en yüksek olduğu kanat profilleri FX 63-137, SG6040, NACA 2415 ve NACA 6412'dir. Bu kanat profillerinin 0° - 15° hücüm açısındaki maksimum taşıma katsayısı değerleri sırasıyla 1.60, 1.23, 1.16 ve 1.10'dur. 0° - 8° hücüm açılarında sürükleme katsayısının en yüksek olduğu kanat pro-

filii NREL's S814'tür. 8° - 13.2° hücum açılarında en yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan kanat profilleri NACA 4424 ve NACA 6415'tir. 13.7° - 14.6° hücum açılarında SD6050 kanat profili ve 14.6° - 15° hücum açılarında ise GOE 795 kanat profilinin en yüksek sürüklenme katsayısı değerine sahip olduğu görülmektedir.

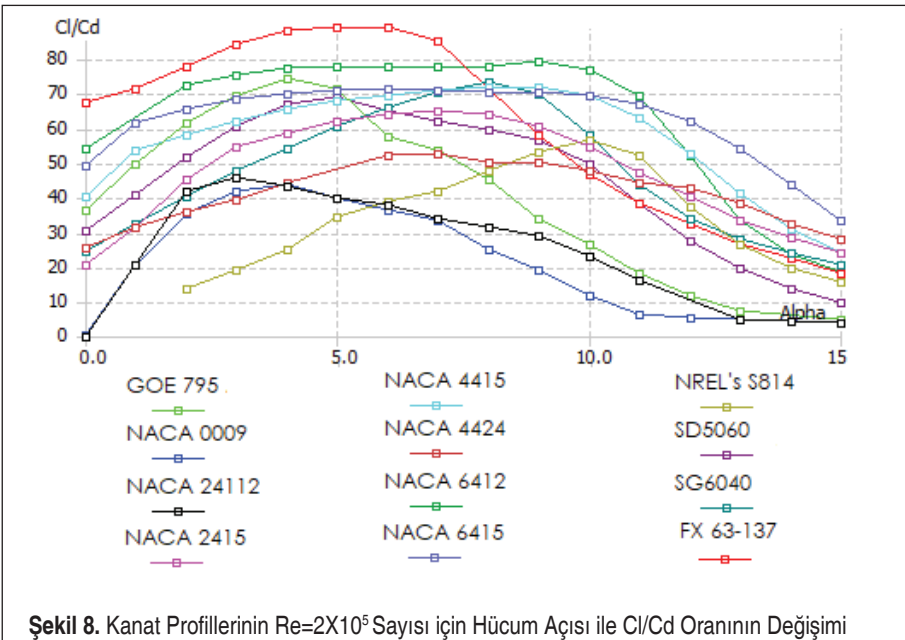
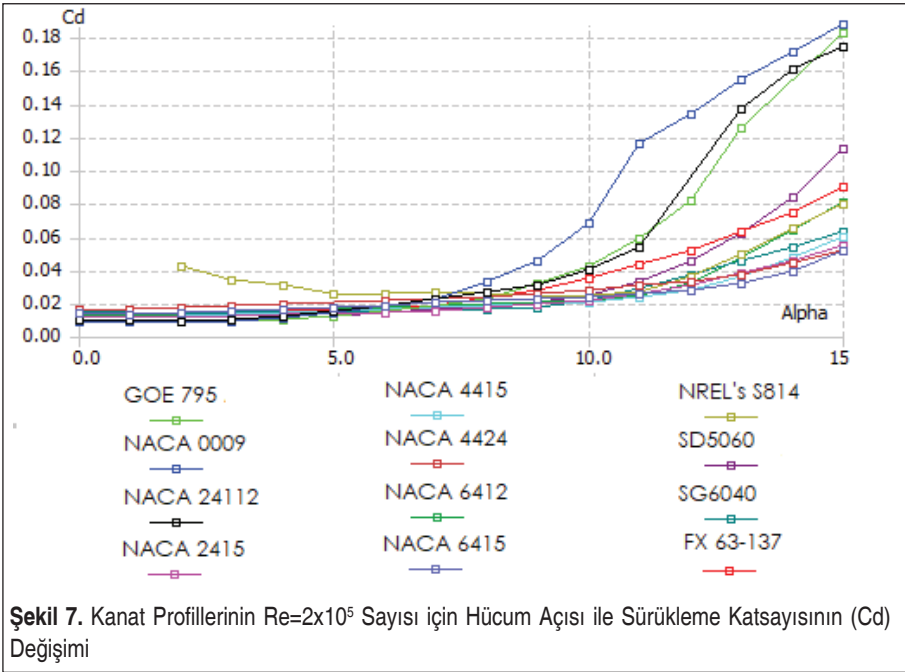
$Re=5 \times 10^4$ sayısı için Cl/Cd oranının en yüksek olduğu kanat profilleri GOE 795, SD5060, NACA 24112, NACA 0009, NACA 2415, FX 63-137 ve SG6040'tır. Bu kanat profillerinin 0° - 15° hücum açısındaki maksimum Cl/Cd oranı değerleri sırasıyla 38, 33, 26.8, 25.65, 24.85, 24.76 ve 23.96'dır.

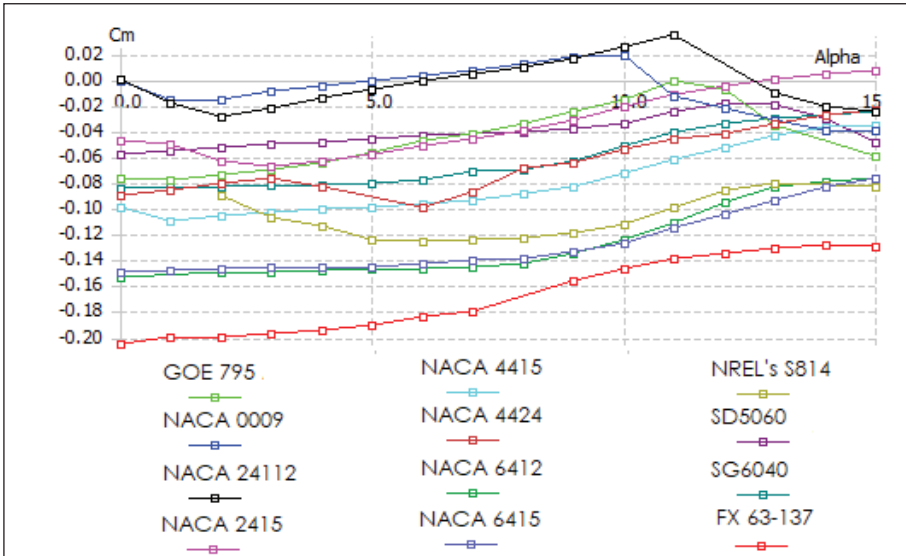


Şekil 6. Kanat Profillerinin $Re=2 \times 10^5$ Sayısı için Hücum Açısı ile Taşıma Katsayısının(Cl) Değişimi

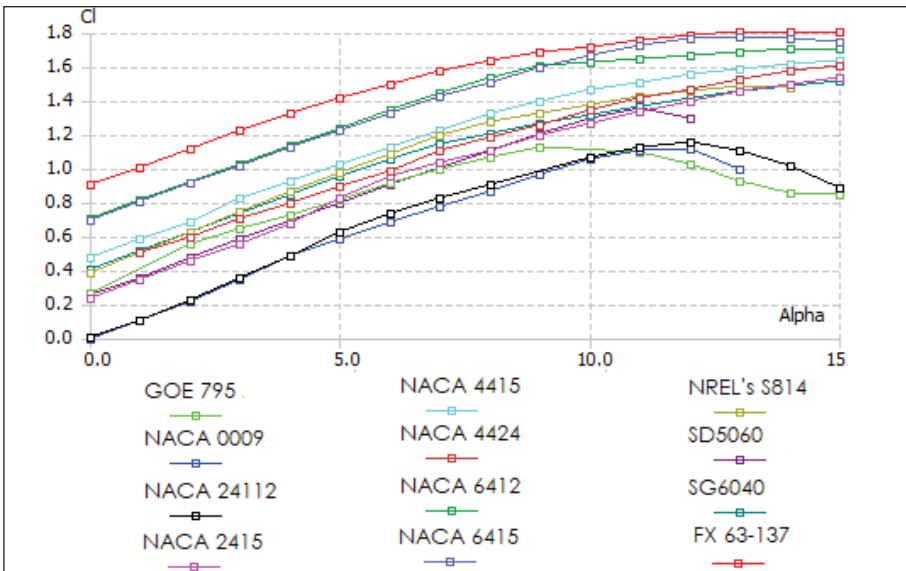
$Re=2 \times 10^5$ sayısı için taşıma katsayısı değerinin en yüksek olduğu kanat profilleri NACA 6415, FX 63-137, NACA 6412 ve NACA 4415'tir. Bu kanat profillerinin 0° - 15° hücum açısındaki maksimum taşıma katsayısı değerleri sırasıyla 1.73, 1.66, 1.65 ve 1.47 'dir. NACA 0009, NACA 24112 ve GOE 795 kanat profillerinin sürüklenme katsayıları 10° hücum açısından sonra diğer kanat profillerine göre daha hızlı artmaktadır.

$Re=2 \times 10^5$ sayısı için Cl/Cd oranının en yüksek olduğu kanat profilleri FX 63-137, NACA 6412, GOE 795, SG6040, NACA 4415 ve NACA 6415'tir. Bu kanat profillerinin 0° - 15° hücum açısındaki maksimum Cl/Cd oranı değerleri sırasıyla 89.12, 78.86, 74.2, 73.06, 71.88 ve 71.33'dür.



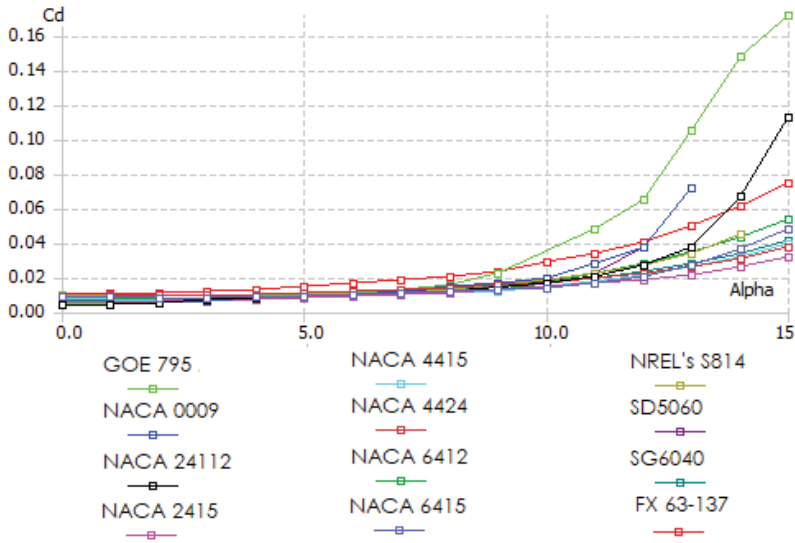


Şekil 9. Kanat Profillerinin $Re=2 \times 10^5$ Sayısı için Hücum Açısı ile Moment Katsayısı (C_m) Değişimi

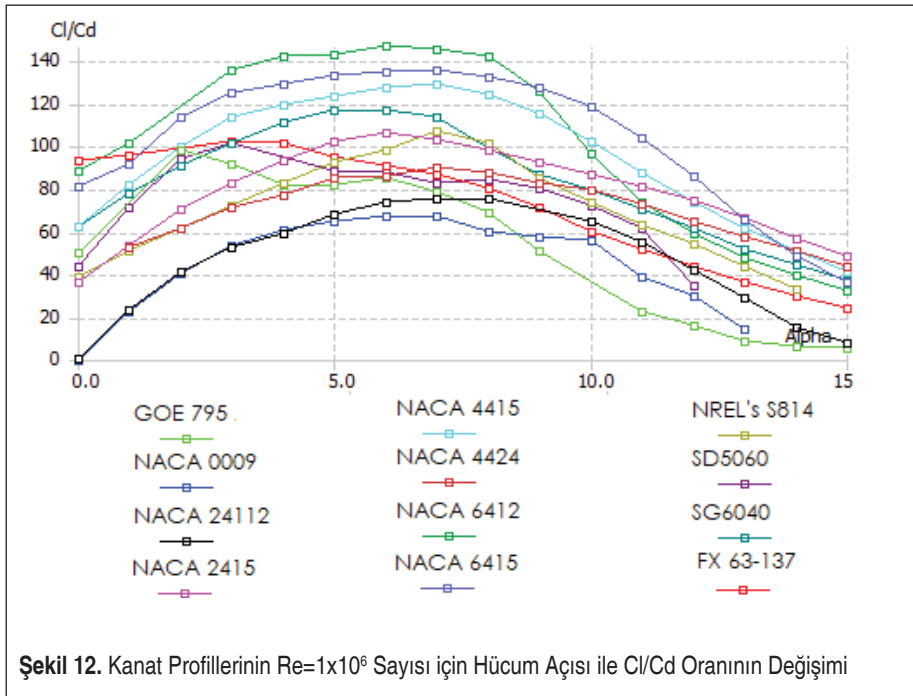


Şekil 10. Kanat profillerinin $Re=1 \times 10^6$ Sayısı için Hücum Açısı ile Taşıma Katsayısının (C_l) Değişimi

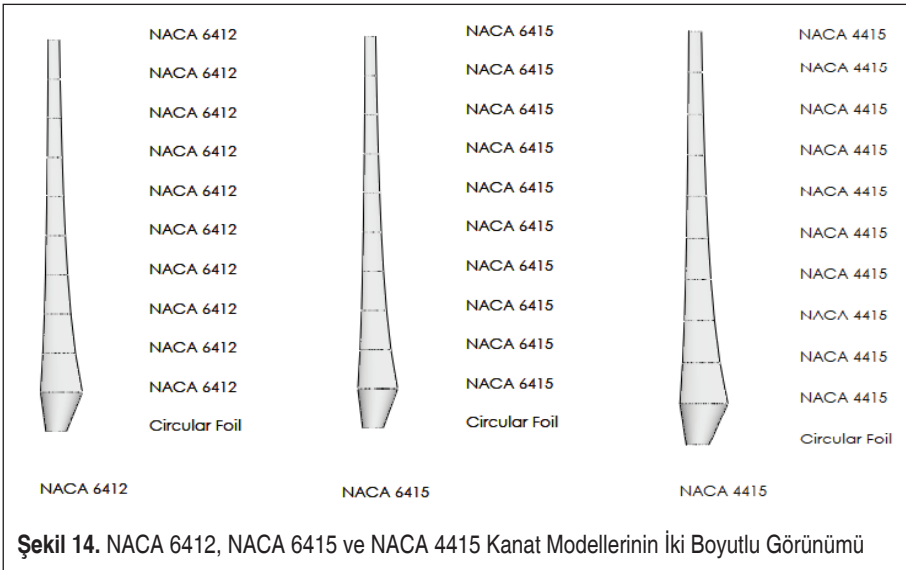
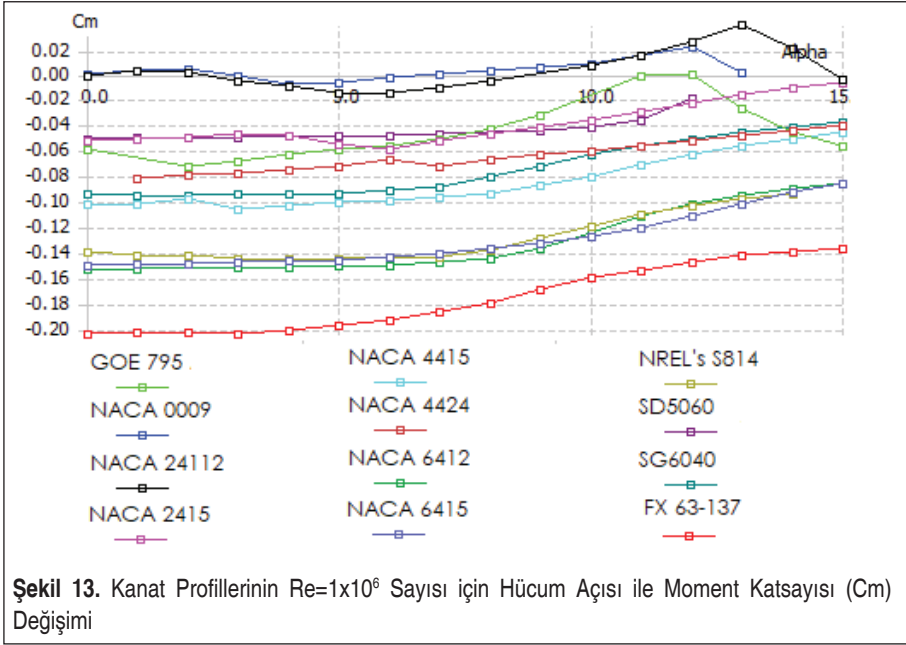
$Re=1 \times 10^6$ sayısı için taşıma katsayısının değerinin en yüksek olduğu kanat profilleri FX 63-137, NACA 6415, NACA 6412 ve NACA 4415'tir. Maksimum taşıma katsayısı değerleri sırasıyla 1.80, 1.74, 1.70 ve 1.63 'tür.



Şekil 11. Kanat Profillerinin $Re=1 \times 10^6$ Sayısı İçin Hücüm Açısı ile Sürüklenme Katsayısının (Cd) Değişimi

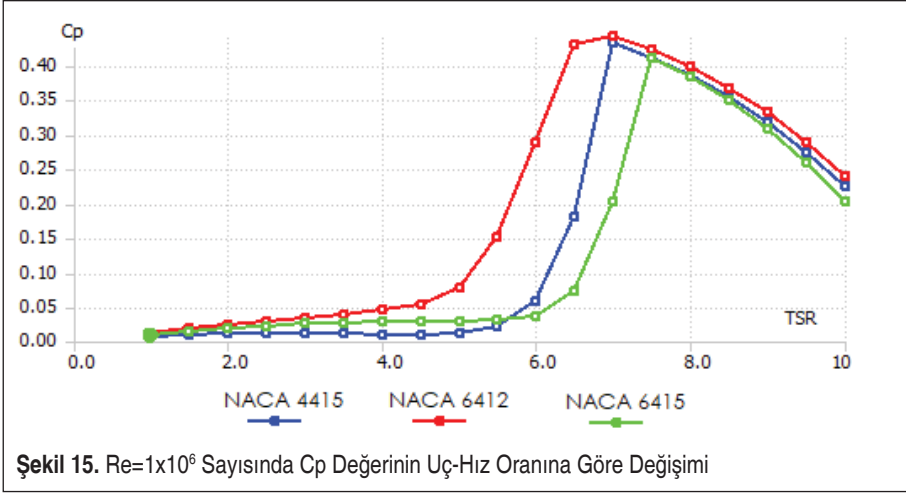


Şekil 12. Kanat Profillerinin $Re=1 \times 10^6$ Sayısı İçin Hücüm Açısı ile Cl/Cd Oranının Değişimi



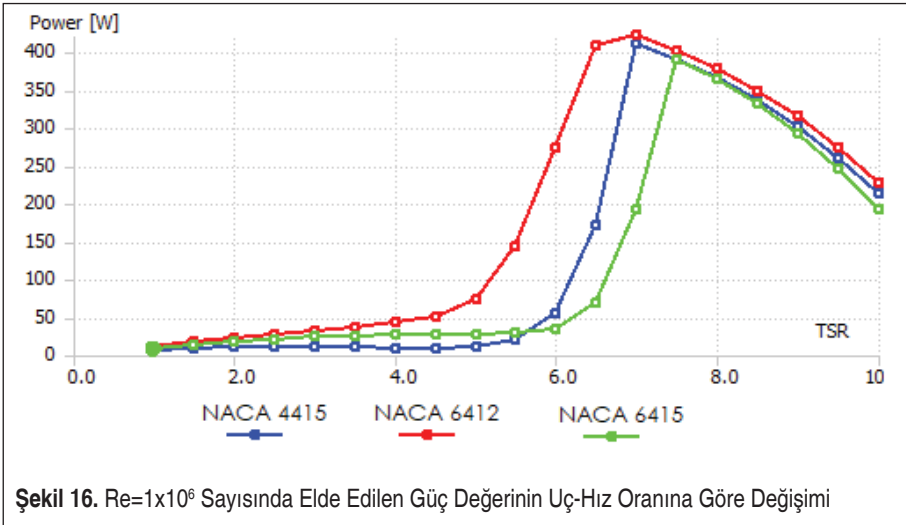
GOE 795 ile NACA 24112 kanat profillerinin en yüksek sürüklenme katsayısına sahip olduğu görülmektedir.

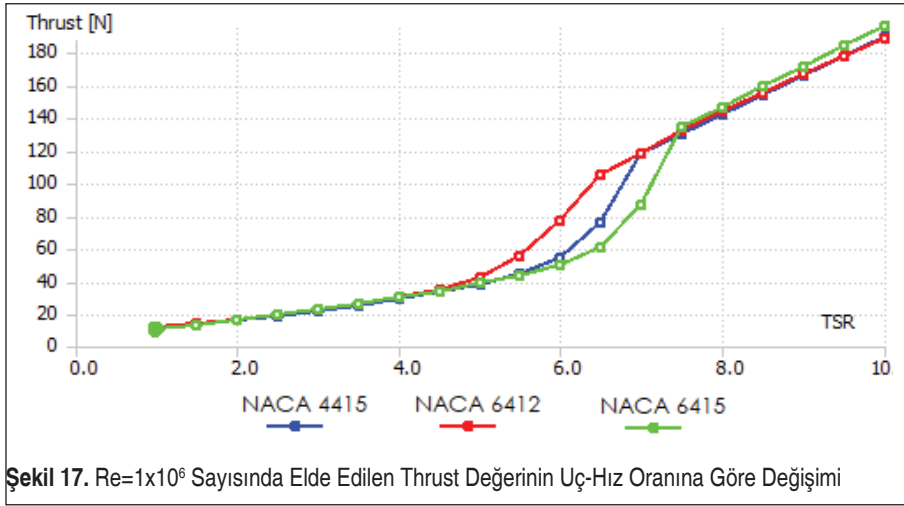
$Re=1 \times 10^6$ sayısında ve $0^\circ-15^\circ$ hücum açısı için Cl/Cd oranının en yüksek olduğu ka-



nat profilleri NACA 6412, NACA 6415, NACA 4415 ve SG6040'tır. Maksimum Cl/Cd oranı değerleri sırasıyla 147.1, 135.5, 128.665 ve 116.6'dır.

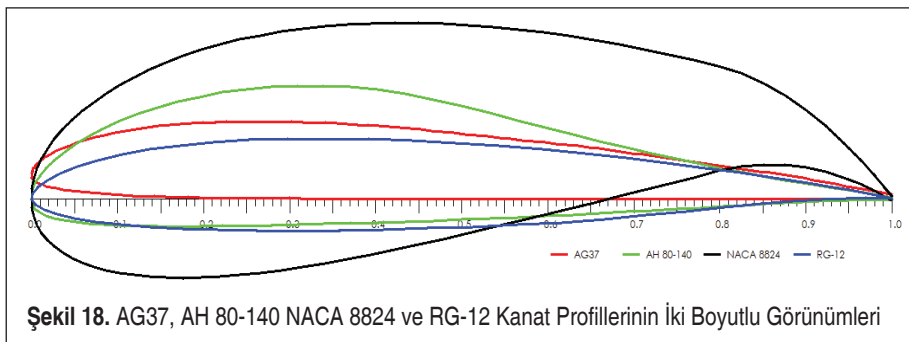
Üç farklı Reynolds sayısında ($Re=5 \times 10^4$, $Re=2 \times 10^5$ ve $Re=1 \times 10^6$) yapılan sayısal analizlerde Cl/Cd oranı en yüksek olan NACA 6412, NACA 6415, NACA 4415 kanat profillerinin Qblade yazılımı ile kanat yapısı ve simülasyonu oluşturulup C_p -TSR, Güç(Power)-TSR ve Thrust-TSR grafikleri oluşturulmuştur. Kanatlar Betz limitine göre tasarlanmıştır. Betz limiti %59.26 ile rüzgâr türbinlerinin teorik olarak ulaşabileceği maksimum verim değeridir [36].

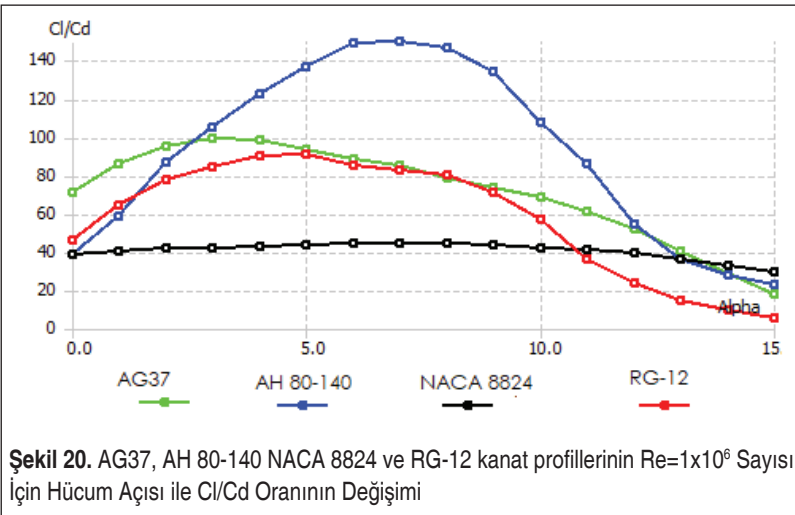
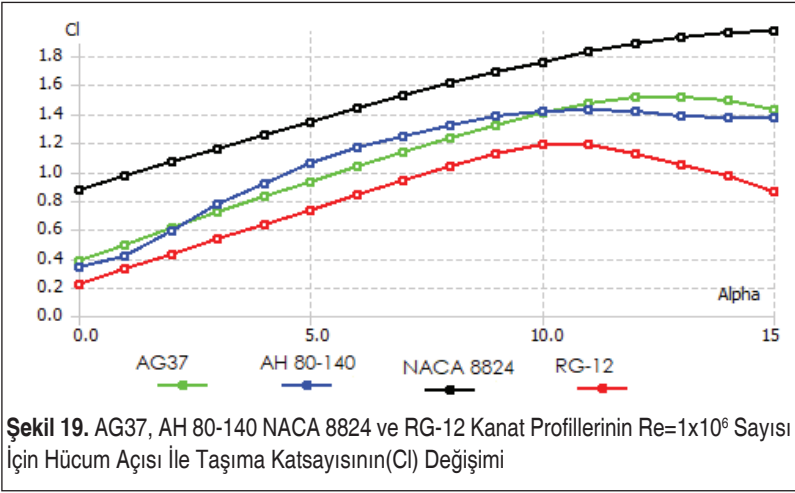




Üç farklı Reynolds sayısında yapılan sayısal analiz en yüksek aerodinamik performansı $Re=1 \times 10^6$ sayısında elde edilmiştir. Bu Reynolds sayısında NACA 6412, NACA 4415 ve NACA 6415 kanat modellerinden oluşan rüzgâr türbinini simülasyonu Qblade yazılımı ile oluşturulmuştur. Sırasıyla maksimum C_p değerleri 0.442, 0.43 ve 0.41'dir. Elde edilen maksimum güç çıkış değerleri sırasıyla 420, 410 ve 390'dır. Bu değerlere NACA 6412 ve NACA 4415 kanat profilleri uç-hız oranı 7'de, NACA 6415 kanat profili ise uç-hız oranı 7.5 'de ulaşmıştır. Uç-hız oranı 10'da Thrust değerleri NACA 6415 için 196, NACA 4415 için 188.5 ve NACA 6412 için ise 188'dir.

Bu kısımda AG37, AH 80-140 NACA 8824 ve RG-12 kanat profilleri 0° - 15° hücum açılarında $Re=1 \times 10^6$ sayısında aerodinamik performansı incelenmiştir. Detaylı literatür taramasından sonra bu kanat profilinin aerodinamik performansının hesaplanmadığı görülmüştür. Bu nedenle gelecek çalışmalar da kaynak olarak kullanılması için bu kanat profillerinin C_l ve C_l/C_d oranları incelenmiştir. Şekil 18'de kanat profilleri-





nin 2 boyutlu görünümü, Şekil 19'da taşıma katsayıları ve Şekil 20'de Cl/Cd oranları verilmiştir.

Şekil 19'a göre kanat profillerinin maksimum taşıma katsayısına göre sıralanışı NACA 8824, AG37, AH 80-140 ve RG-12 şeklindedir. Maksimum Cl değerleri sırasıyla 1.97, 1.505, 1.417 ve 1.185 olarak bulunmuştur. Şekil 20'ye göre kanat profillerinin maksimum Cl/Cd oranlarına göre sıralanması AH 80-140, AG37, RG-12 ve NACA 8824'tür. Maksimum Cl/Cd oranları sırasıyla 149.8, 98.5, 91 ve 45'dir. Tablo 2'de kanat profillerinin aerodinamik performansları detaylı bir şekilde verilmiştir.



Tablo 2. AG37, AH 80-140 NACA 8824 ve RG -12 Kanat Profillerinin Farklı Hücüm Açılarındaki Aerodinamik Performansları

Re=1x10 ⁶	5°		10°		15°	
	Cl	Cl/Cd	Cl	Cl/Cd	Cl	Cl/Cd
AG37	0.92	93	1.40	68.5	1.42	18
AH 80-140	1.05	136	1.41	108	1.37	23
NACA 8824	1.34	43,5	1.75	42	1.97	30
RG-12	0.725	91	1.18	57	0.85	6

Bu çalışmada Qblade yazılımı kullanılmıştır. Qblade ile yapılan bu çalışma sonucunda bulunan değerler ile literatürde bulunan değerlerin uyduğu gözlemlenmiştir. Literatür taramasından sonra Qblade yazılımının kanat profillerinin performansını hesaplanmasında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Tablo 1’de kanat profillerinin sayısal analizleri verilmiştir. Bu tablodaki amaç Qblade yazılımı kullanılarak bulunan sonuçların literatürdeki sonuçlar ile uyumlu olduğunu göstermektir.

4. SONUÇ

Qblade yazılımını kullanarak rüzgâr türbinlerinde kullanılan farklı kanat profillerinin sayısal analizi simülasyon oluşturularak yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Karşılaştırılması yapılan 12 kanat profillerinin 5×10^4 , 2×10^5 ve 1×10^6 Reynolds sayılarında en yüksek taşıma katsayısına sahip olan kanat profilleri sırasıyla FX 63-137, NACA6415 ve FX 63-137’dir. Bu kanat profillerinin sırasıyla taşıma katsayıları 1.60, 1.73 ve 1.80 olarak bulunmuştur. Hücüm açısının artmasıyla taşıma katsayısının arttığı gözlemlenmiştir.

Karşılaştırılması yapılan 12 kanat profillerinin 5×10^4 , 2×10^5 ve 1×10^6 Reynolds sayılarında en yüksek Cl/Cd oranına sahip olan kanat profilleri sırasıyla GOE 795, FX 63-137 ve NACA 6412’dir. Bu kanat profillerinin sırasıyla Cl/Cd oranları 38, 89.12 ve 147.1 olarak bulunmuştur.

3 farklı Reynolds sayısında yapılan çalışmanın sonucunda ise Reynolds sayısının artmasıyla birlikte hem taşıma katsayılarının hem de Cl/Cd oranlarının arttığı ve sürüklenme katsayılarının azaldığı gözlemlenmiştir. En iyi sonuç 1×10^6 Reynolds sayısında alınmıştır.

Simülasyonu oluşturulan rüzgâr türbinlerinde Cp ve güç değerlerine bakıldığında maksimum verim alınan aralık NACA 6412 kanat profili için uç-hız oran aralığı 6.5-7.5, NACA 4415 kanat profili için uç-hız oran aralığı 6.95-7.5 ve NACA 6415 kanat profili için uç-hız oran aralığı 7.45-7.8’dir.

Daha önce detaylı olarak aerodinamik performansı üzerine çalışma yapılmayan AG37, AH 80-140 NACA 8824 ve RG-12 kanat profilleri belirlenmiştir. Bu kanat profilleri literatüre katkı sağlamak amacıyla Qblade yazılımı ile incelenmiştir. AH 80-140 kanat profilinin maksimum Cl/Cd oranının karşılaştırılması yapılan diğer 12 kanat profillinden daha yüksek olduğu görülmüştür ($Re=1 \times 10^6$, AH 80-140:149.8, NACA 6412: 147.1).

Kanat profillerinin Qblade yazılımı ile yapılan sayısal analiz sonucunda elde edilen taşıma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve Cl/Cd oranının literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Qblade ile kanat profillerinin sayısal analizlerinin yapılmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

1. **Chehour, A., Younes, R., Ilinca, A., & Perron, J.** (2015). Review of performance optimization techniques applied to wind turbines. *Applied Energy*, 142, 361-388.
2. **Kadir, K. A. Y. A., & Erdem, K. O. Ç.** (2015). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı Ve Üretim Esasları. *Mühendis Ve Makina*, 56(670), 38-48.
3. **Körpe, S., & Darak, H.** (2017). Düz Uçuş için Kanat Profilli Eniyilemesi. *Journal of Aviation*, 1(2), 107-119.
4. **Alaskari, M., Abdullah, O., & Majeed, M. H.** (2019, May). Analysis of wind turbine using QBlade software. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 518, No. 3, p. 032020). IOP Publishing.
5. **Koç, E., Gunel, O., & Yavuz, T.** (2016). Mini-Scaled Horizontal Axis Wind Turbine Analysis By Qblade And Cfd. *International Journal Of Energy Applications And Technologies*, 3(2), 87-92.
6. **Görgülü, Y. F., Özgür, M. A., & Ramazan, K. Ö. S. E.** (2021). CFD Analysis of a Naca 0009 Aerofoil at a Low Reynolds Number. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
7. **Şahin, İ., & Acir, A.** (2015). Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(1), 22-25.
8. **Tanürün, H. E., İsmail, A. T. A., Canlı, M. E., & Adem, A. C. I. R.** (2020). Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi. *Politeknik Dergisi*.
9. **Singh, B., & Gill, H. S.** (2020). Wind turbine blade design for low rotational inertia materials at variable speeds with different twisting angle using Q-Blade. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1666-1670.
10. **Husaru, D. E., Bârsănescu, P. D., & Zaharica, D.** (2019, September). Effect of yaw angle on the global performances of Horizontal Axis Wind Turbine-QBlade simulation. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 595, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
11. **Raut, S., Shrivastava, S., Sanas, R., Sinnarkar, N., & Chaudhary, M. K.** (2017). Simulati-



- on of micro wind turbine blade in Q-blade. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 5, 256-262.
12. **Handoyono, N. A., & Wardhana, A. G. S.** (2019). Comparison Of Hint Wind Tines Of Airfoil Type NACA 4412, NACA 23012, and NACA 16-212 Using Qblade Software. *Vanos Journal of Mechanical Engineering Education*, 4(1).
 13. **Muftah, A.** (2019). CFD Modeling of Airfoil of wind turbine under different effect of operating conditions. *SUSJ Journal*, Sirte University, 9(1), 27-43.
 14. **Shabur, A., Hasan, A., & Ali, M.** (2020). Comparison of Aerodynamic Behaviour between NACA 0018 and NACA 0012 Airfoils at Low Reynolds Number Through CFD Analysis. *Advancement in Mechanical Engineering and Technology*, 3(2).
 15. **Zahari, M. F.** (2013). A Study of Drag Force on Different Type of Airfoil in a Subsonic Wind Tunnel (Doctoral dissertation, UMP).
 16. **García, V., Vargas, L., Acuña, A., Sosa, J. B., Durazo, E., Ballesteros, R., & Ocampo, J.** (2019). Evaluation of basalt fibers on wind turbine blades through finite element analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
 17. **Hasan, D. Ü. Z.** (2016). Rüzgâr Türbinleri için Farklı Kanat Profillerinin Sayısal Olarak Test Edilmesi. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2).
 18. **Wang, Q., Chen, J., Pang, X., Li, S., & Guo, X.** (2013). A new direct design method for the medium thickness wind turbine airfoil. *Journal of Fluids and Structures*, 43, 287-301.
 19. **Selig, M. S., & McGranahan, B. D.** (2004). Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines. *J. Sol. Energy Eng.*, 126(4), 986-1001.
 20. **Kale, S. A., Birajdar, M. R., & Sapali, S. N.** (2016). Numerical Analysis of New Airfoils for Small Wind Turbine Blade. *J Altern Energy Sources Technol*, 6(1), 1-6.
 21. **Nachtane, M., Tarfaoui, M., Saifaoui, D., & Rouway, M.** (2020). Hydrodynamic performance evaluation of a new hydrofoil design for marine current turbines. *Materials Today: Proceedings*, 30, 889-898.
 22. **Mahmuddin, F.** (2017). Rotor blade performance analysis with blade element momentum theory. *Energy Procedia*, 105, 1123-1129.
 23. **Singh, R. K., Ahmed, M. R., Zullah, M. A., & Lee, Y. H.** (2012). Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable energy*, 42, 66-76.
 24. **Balzan, M., Abdollahi, A., Wells, F. S., & Willmott, G. R.** (2021). Drop Impact of Non-Newtonian Dairy-Based Solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 126895.
 25. **Emniyetli, G.** 2007. Eysel elektrik ihtiyacının karşılanması için Rüzgâr türbini tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 134 sayfa, Çorlu.
 26. **Şenel, M. C., & Erdem, K. O. Ç.** (2014). Kanat Tasarım Parametrelerinin Rüzgâr Türbini Aerodinamik Performansına Etkisi. *V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, 8-10.
 27. **Marten, D., & Wendler, J.** (2013). Qblade guidelines. Ver. 0.6, Technical University of (TU Berlin), Berlin, Germany.



28. **Nath, R., & Bhattacharjee, S.** (2018). Computational Intelligence for Numerical Analysis of Wind Energy Conversion System. *International Journal of Computational Intelligence & IoT*, 1(1).
29. **Moriarty, P. J., & Hansen, A. C.** (2005). AeroDyn theory manual (No. NREL/TP-500-36881). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
30. **Winslow, J., Otsuka, H., Govindarajan, B., & Chopra, I.** (2018). Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers (10 4–10 5). *Journal of Aircraft*, 55(3), 1050-1061.
31. **Rodriguez, M. C., & Morales, M. C.** (2014). Morphology development of an airfoil by numerical analysis.
32. **Hadi, M. I., Nazri, M., & Abdullah, A.** (2006). Vortex formation in unsteady flow over NACA 4412 and NACA 4424 airfoils. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 15, 27-33.
33. **Zaheer, Z., Roy, K. R., Nair, G. S., Ragipathi, V., & Niranjana, U. V.** (2019, November). CFD analysis of the performance of different airfoils in ground effect. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1355, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
34. **Ali, R., Akhtar, S., Farhan, M., & Alam, F.** (2021). Numerical investigation of aerodynamic parameters across NaCa6415 airfoil. *Materials Today: Proceedings*.
35. **Gunel, O., Koç, E., & Yavuz, T.** (2016). Comparison of CFD and Xfoil airfoil analyses for low Reynolds number. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 3(2), 83-86.
36. **Atılğan, M., Altan, B. D., & Atlıhan, A. B.** Rüzgâr Türbini Uygulamaları.